

2023 年度採択

量子分野

年次報告書（公開版）

研究期間 2024 年 2 月 1 日～2027 年 3 月 31 日

1. 研究成果の概要

① 研究構想にかかる成果

<実施したこと>

- 1) ユーリツヒ研究所で作製した GeSn 薄膜の磁気抵抗の測定を行い、移動度とキャリア濃度の基本的な評価を行うとともに、弱局在効果の測定を行った。
- 2) ユーリツヒ研究所で作製したトポロジカル絶縁体細線を有するジョセフソン接合デバイスの電気伝導特性を理研および磁気輸送測定を東北大学にて測定した。
- 3) ユーリツヒ研究所で作製した超伝導電極を持つ磁性トポロジカル絶縁体薄膜の電気伝導特性を理研で測定した。
- 4) アイントホーヘン工科大学で作製した超伝導電極を持つ PbTe ナノワイアの電気伝導特性を理研で測定した。PbTe は極めて大きなスピン軌道相互作用を有し、そのトポロジカル超伝導にむけた魅力的な材料である。同グループは基板に沿って PbSn ナノワイアを成長する技術を有している。
- 5) ユーリツヒ研究所がシャドーマスク法を用いた新たな材料成長法を開発し、当該手法を用いて成長したトポロジカルナノワイアの磁気輸送測定を東北大学にて行った。

<得られた成果>

- 1) P をドーピングした GeSn 薄膜を成長し、ホールバー形状に加工した試料の磁気抵抗を測定し、Sn の濃度を変えながら $200\sim 700\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度の移動度、 10^{19}cm^{-3} 程度のキャリア濃度を得た。また、コヒーレントな伝導に伴う弱局在効果の測定から、150nm 程度の位相コヒーレンス長を得た。
- 2) 超伝導電流を得ることは成功したが、ゲート電極からのリーク電流の影響が大きいため、ジョセフソン接合デバイスとしての評価を行うことはできなかった。デバイス構造の設計を最適化する必要がある。
- 3) 超伝導電極金属と磁性トポロジカル絶縁体薄膜の界面抵抗が高いため、超伝導電流を得ることができなかった。磁性トポロジカル絶縁体薄膜の品質の向上と電極形成を含めたデバイスプロセスの改良が必要である。
- 4) PbTe ナノワイアにゲートおよび超伝導電極を付けたジョセフソン接合デバイスにおいて、超伝導電流を得ることができた。しかし、デバイスの歩留まりは十分に高くはなく、振る舞いが説明できない試料や、量子ドットのふるまう試料もある。興味深い観測として、量子ドットのふるまうにもかかわらずクーロンブロック効果は無視できるほどに小さいことが分かった。このことは、PbTe の大きな誘電率と関係していると思われる。
- 5) シャドーマスク法は In-situ で結晶成長およびデバイス作製までを一気に行うことができ、きわめて清浄な半導体と超伝導体との接合を形成することができる。この手法を用いて 100nm 細線構造を形成しその磁気輸送測定から量子干渉効果が観測された。

② 国際頭脳循環の促進にかかる成果

<実施したこと>

- 1) 2024 年 6 月 10 日 - 13 日の間、ユーリツヒ研究所において本 ASPIRE プログラムのキックオフミーティングを開催した。それに関わりアイントホーヘン工科大学、アーヘン工科大学訪問し共同研究議論を進めた。
- 2) 2024 年 7 月 19 日 - 8 月 2 日の間、量子技術に関わるハンズオンプログラム(Tohoku University Engineering Summer Program : TESP)を実施し、海外から多数の学生が参加した。
- 3) 2024 年 10 月 31 日 - 11 月 1 日の間、スピン・量子状態そして光の空間構造に関する物理と応用に関するワークショップを開催し、ユーリツヒ研究所・東北大学・量子技術研究開発機構・科学技術振興機構・埼玉大学から総勢 50 名ほどの研究者が参加し量子技術に関わる頭脳循環ネットワークの形成を行った。

＜得られた成果＞

- 1) ユーリッヒ研究所において、理研・東北大側で行っている研究を紹介し、今後の共同研究における材料およびデバイス構造に関して議論を行った。アーヘン工科大学の Christoph Stampher 教授を訪問し、理研で行っている研究を紹介するセミナー発表を行うとともに、2 次元物質を用いた量子ナノ構造の作成および量子ドットデバイスに関する議論を行うとともに、将来の共同研究の可能性について意見交換を行った。
- 2) Quantum Materials Engineering Course として、量子マテリアルに関わる結晶成長からその特性評価までを行うハンズオンプログラムを実施した。ベルギー・ドイツ・中国から学生が参加した。2 週間にわたるプログラムの前半が講義形式で量子マテリアル及び量子技術に関する講義を進め、後半では 2 次元材料の結晶成長とその評価を行い最後プレゼンテーションを行った。
- 3) 2024 年 10 月 31－11 月 1 日で東北大主催のもと、スピン空間構造の量子状態とその応用に関するワークショップを開催し、ユーリッヒ研究所・東北大学・量子技術研究開発機構・科学技術振興機構・埼玉大学から総勢 50 名ほどの研究者が集まり、2 日間にわたり口頭講演およびポスター講演を開催した。これによりドイツ側 PI および若手研究者も日本の量子技術に関わるネットワークに参画することができ、相互の国際頭脳循環に資するネットワーク形成を行うことができた。

2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
研究テーマ1	好田 誠	東北大学大学院工学研究科・教授
研究テーマ2	Thomas Schäpers	ユーリッヒ研究センター・ピーター・グリュンベルグ研究所・グループリーダー
研究テーマ3	石橋 幸治	理化学研究所開拓研究本部・主任研究員

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

[1] P. Kaul, O. Concepción, C. Li, D.H. Wielens, P.Zellekens, Z. Ikonik, K. Ishibashi, D. Grützmacher, Q-T. Zhao, A. Brinkman, D. Buca, “Phase-Coherent Transport in GeSn Alloys on Si”, Advanced Electronic Materials 2024, 2400565 (1-8)
<https://doi.org/10.1002/aelm.202400565>

[2] Takeshi Odagawa, Sota Yamamoto, Chaoliang Zhang, Kazuki Koyama, Jun Ishihara, Giacomo Mariani, Yoji Kunihashi, Haruki Sanada, Junsaku Nitta, and Makoto Kohda, “Enhanced interlayer electron transfer by surface treatments in mixed-dimensional van der Waals semiconductor heterostructures”, APL Materials 12 2024, 061120, 10.1063/5.0214718

[3] Manato Kawahara, Yuichiro Abe, Koki Takano, F. Joseph Heremans, Jun Ishihara, Sean E. Sullivan, Christian Vorwerk, Vrindaa Somjit, Christopher P. Anderson, Gary Wolfowicz, Makoto Kohda, Shunsuke Fukami, Giulia Galli, David D. Awschalom, Hideo Ohno, and Shun Kanai,

“Polarization-dependent photoluminescence of Ce-implanted MgO and MgAl₂O₄”,
Applied Physics Express 17 2024, 072004, 10.35848/1882-0786/ad59f4

[4] Zhaojun Li, Henry Nameirakpam, Elin Berggren, Ulrich Noubbe, Takashi Kimura, Eito Asakura, Victor Gray, Deepa Thakur, Tomas Edvinsson, Andreas Lindblad, Makoto Kohda, Rafael B. Araujo, Akshay Rao, and M. Venkata Kamalakar, “Synchronized Photoluminescence and Electrical Mobility Enhancement in 2D WS₂ through Sequence-Specific Chemical Passivation”, Journal of the American Chemical Society 146 2024, 35146, 10.1021/jacs.4c11052

[5] G. Mariani, Y. Kunihashi, L. Smet, T. Wakamura, S. Sasaki, J. Ishihara, M. Kohda, J. Nitta, and H. Sanada, “Two-color Kerr rotation spectroscopy of a suspended transition-metal dichalcogenide monolayer”, Applied Physics Letters 125 2024, 252401, 10.1063/5.0240071